

REF A4



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

①2 **Offenlegungsschrift**  
①0 **DE 42 03 582 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 01 R 33/38**  
H 01 F 7/20

②1 Aktenzeichen: P 42 03 582.1  
②2 Anmeldetag: 7. 2. 92  
④3 Offenlegungstag: 2. 9. 93

DE 42 03 582 A 1

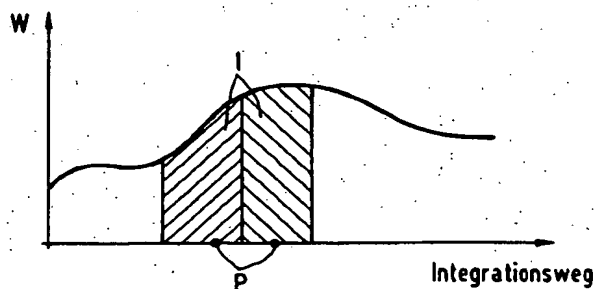
⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Pausch, Günther, 8521 Effeltrich, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Transversale Gradientenspule

⑤7 Bei einer transversalen Gradientenspule werden die Stützpunkte für die Spulenleiter dadurch bestimmt, daß über den Träger ein Gittermaschennetz aus Elementarsattelspulen gelegt wird. Das Magnetfeld dieser Elementarsattelspulen wird berechnet und mittels eines Fit-Algorithmus aufgrund einer vorgegebenen Ziel-Feldverteilung für jede Elementarsattelspule eine Ampere-Windungszahl festgelegt. Durch Integration werden schließlich diskrete Leiterpositionen ermittelt, die als Stützpunkte für die Bahn des Spulenleiters dienen.



DE 42 03 582 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 07. 93 308 035/8

8/48

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine transversale Gradientenspule, wie sie insbesondere für Kernspin-Tomographiegeräte verwendet wird.

Bekanntlich erfolgt eine Ortsauflösung der Kernresonanzsignale in der Kernspintomographie dadurch, daß einem homogenen, statischen Grundfeld in der Größenordnung von 1 Tesla ein Magnetfeld-Gradient überlagert wird. Die Prinzipien der Bildgebung sind beispielsweise in dem Artikel von Bottomley "NMR Imaging Techniques and Applications: A Review" in Review of Scientific Instrumentation 53, 9, 9/82, Seiten 1319 bis 1337, erläutert. Zur Ortsauflösung in drei Dimensionen müssen Magnetfeldgradienten in drei vorzugsweise senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen erzeugt werden. In den Fig. 1 und 2 ist jeweils ein Koordinatenkreuz x, y, z eingezeichnet, das die Richtungen der jeweiligen Gradienten darstellen soll. Fig. 1 zeigt schematisch eine herkömmliche Anordnung von transversalen Gradientenspulen für die Erzeugung eines Magnetfeldgradienten  $G_y$  in y-Richtung. Die Gradientenspulen 2 sind als Sattelspulen ausgeführt, die auf einem Tragrohr 1 befestigt sind. Durch die Leiterabschnitte 2a wird innerhalb eines kugelförmigen Untersuchungsvolumens 11 ein weitgehend konstanter Magnetfeldgradient  $G_y$  in y-Richtung erzeugt. Die Rückleiter erzeugen aufgrund ihrer Größe und Entfernung vom Untersuchungsvolumen 11 dort lediglich geringe Magnetfeldkomponenten, die bei der Auslegung der Gradientenspule vielfach vernachlässigt werden.

Die Gradientenspulen für den x-Magnetfeldgradienten sind identisch zu den Gradientenspulen 2 für den y-Magnetfeldgradienten aufgebaut und lediglich auf dem Tragrohr 1 um 90° in azimuthaler Richtung verdreht. Der Übersichtlichkeit wegen sind sie daher in Fig. 1 nicht dargestellt.

Die (axialen) Gradientenspulen 3 für den Magnetfeldgradienten in z-Richtung sind in Fig. 2 schematisch dargestellt. Die Spulen sind ringförmig ausgeführt und symmetrisch zum Mittelpunkt des Untersuchungsvolumens 11 angeordnet. Da die beiden Einzelspulen 3a und 3b in der in Fig. 2 dargestellten Weise in entgegengesetzter Richtung stromdurchflossen sind, verursachen sie einen Magnetfeldgradienten in z-Richtung.

An die Linearität der Gradientenfelder werden zur Vermeidung von Bildverzerrungen hohe Anforderungen gestellt, die mit den schematisch dargestellten einfachen Leiterstrukturen nach den Fig. 1 und 2 nicht zu erreichen sind. Dabei sind insbesondere die transversalen Gradientenspulen ( $G_x$ ,  $G_y$ ) aufwendig in der Auslegung und Gegenstand der vorliegenden Erfindung.

Zur Auslegung von Gradientenspulen gibt es prinzipiell zwei Vorgehensweisen:

- den analytischen Ansatz und
- den numerischen Ansatz.

Der analytische Ansatz birgt dabei das Problem, daß der gewünschte lineare Feldverlauf in seiner streng mathematischen Form zu technisch nicht realisierbaren Lösungen führt, die die Einführung relaxierender Randbedingungen notwendig macht. Dem Algorithmus werden bezüglich Grad, Ordnung und Amplitude willkürliche Fehlerterme beigelegt, die im allgemeinen bezüglich des physikalisch-technisch-Machbaren kein Optimum darstellen.

Hier ist der numerische Ansatz von Vorteil: Durch

geeignete mathematische Optimierungsverfahren (im einfachsten Fall z. B. least-mean-square fit) ergeben sich neben dem erwünschten Feldverlauf Abweichungen, die nur in ihrer Amplitude, nicht aber bezüglich ihres Grades und Ortung der Störung minimiert sind.

Da der Ansatz bereits die physikalische Natur der Anordnung berücksichtigt, wird sich ein "natürliches Fehlerspektrum" ergeben.

Aufgrund des großen Parameterraumes sind numerische Verfahren jedoch im allgemeinen auf einfache Spulengeometrien beschränkt (z. B. Sattelspulen).

Eine komplexere Spulengeometrie wurde im Patent US-44 56 881 (Technicare) beschrieben. Dabei wird die Spulenfläche in eine Vielzahl von Flächenelementen unterteilt. In jedem dieser Elemente wird ein Stromdichte-Vektor so bestimmt, daß die daraus resultierende Stromdichte-Verteilung das gewünschte Zielfeld mit einer maximal zulässigen Fehleramplitude erzeugt. Da dieses Verfahren die Kontinuitätsbedingung nicht berücksichtigt, fehlen den so berechneten Spulen die jeweiligen Leiterrückführungen. Diese werden deshalb ohne Berücksichtigung ihrer Auswirkung auf das Gradientenfeld am äußersten Ende der Spule angefügt. Daraus resultiert jedoch ein Feldfehler, der einen Nachteil dieses Verfahrens darstellt.

Aufgabe der Erfindung ist es, transversale Gradientenspulen so auszulegen, daß sie einen möglichst linearen Feldverlauf erzeugen, wobei außerdem erwünschte Randbedingungen in die Auslegung einbeziehbar sind.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 1. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Das Verfahren nach Patentanspruch 1 vermeidet die Nachteile der eingangs genannten Verfahren und ermöglicht eine numerische Berechnung von komplexen Spulenstrukturen ohne Einschränkung. Durch Einführung der in den Unteransprüchen angegebenen physikalischen Randbedingungen können die Gradientenspulen so ausgelegt werden, daß sie über die Erzeugung eines optimierten Gradientenfeldes hinaus spezielle Eigenschaften besitzen. Durch Einführung physikalischer Randbedingungen können z. B. folgende Eigenschaften erreicht werden:

- Berücksichtigung und aktive Korrektur der Feldfehler, die auf Wirbelströme im Kryoschild zugehen,
- Minimierung der Wirbelströme im Kryoschild,
- Lärmreduzierung durch Minimierung der globalen Biegekräfte,
- Optimierung des mechanischen Schwingungsverhaltens durch Minimierung der Reaktionskräfte-Magnet-Gradientenspule.

Nachfolgend wird beispielhaft anhand der Fig. 3 bis 8 die Auslegung einer Gradientenspule gemäß der Erfindung erläutert.

Zur Auslegung der Spule wird die geplante Spulenoberfläche zunächst in eine Vielzahl von rechteckigen, aneinander anschließenden Elementarflächen zerlegt, so daß ein Gittermaschenetz entsteht. Dies ist in Fig. 3 schematisch dargestellt, wobei die einzelnen Elementarflächen oder Maschen mit 1 bis n durchnummeriert sind. Jede dieser Flächen denkt man sich von einem Leiter umschlossen, so daß gedanklich eine Vielzahl von "Elementarsattelspulen" entsteht, die jeweils aus einer Windung bestehen.

Anschließend wird für einen vorgegebenen Spulen-

strom die Wirkung jeder mit einem Strom  $I$  durchflossenen Elementarsattelspule auf das Magnetfeld im Untersuchungsbereich berechnet. Für die Magnetfeldberechnung gibt es eine Vielzahl bekannter Verfahren, wobei am gebräuchlichsten die Berechnung aufgrund von Kugelfunktionen ist, wie es beispielsweise in dem Artikel Magnet Field Profiling: Analysis and Correcting Coil Design, Magnetic Resonance in Medicine 1, 44-65 (1984) von Romeo und Hoult dargestellt ist. In Kugelfunktionsdarstellung sei beispielsweise  $A_{11}(i)$ ,  $A_{31}(i)$ ,  $A_{51}(i)$ ,  $A_{33}(i)$ ,  $A_{53}(i)$  ... das Feldspektrum der  $i$ -ten Elementar-Sattelspule. Für Gradienten strebt man im allgemeinen linearen Verlauf an, so daß das gewünschte Zielfeld folgendes Spektrum aufweist:

$$A_{11} = 1, A_{31} = A_{51} = A_{33} = 0.$$

Ziel des Berechnungsverfahrens ist es zunächst, für jede Elementarsattelspule eine Windungszahl derart festzulegen, daß das Zielfeld möglichst genau erreicht ist. Die Windungszahlen  $W_1$  bis  $W_n$  mit einzelnen Elementar-Sattelspulen lassen sich in Form eines "Windungsvektors"  $W$  nach Fig. 4 darstellen, wobei  $W(i)$  angibt, wieviele Windungen (auch Bruchteile davon) für die  $i$ -te Elementarsattelspule zum Erreichen des Zielfeldes benötigt werden. Diesem Windungsvektor  $W$  ist eine Matrix zugeordnet, in der zeilenweise die Kugelfunktionsterme bzw. Entwicklungskoeffizienten für jede einzelne Sattelspule aufgetragen sind. Mittels eines geeigneten Fit-Algorithmus kann dann ein "Windungsvektor"  $W$  so berechnet werden, daß  $W(i)$  angibt, wieviele (nicht notwendigerweise ganzzahligen) "Windungen" für die  $i$ -te Elementarsattelspule zum Erreichen des Zielfeldes benötigt werden.

Wie aus Fig. 5 deutlich wird, ist jede einzelner Zweig einer Elementarsattelspule auch Bestandteil einer benachbarten Elementarsattelspule. Der zu diesem Zweig gehörende Windungsanteil ergibt sich deshalb aus der Überlagerung der beiden Komponenten unter Berücksichtigung des Vorzeichens. Bezieht man diesen Wert auf die gesamte dem Zweig zur Verfügung stehende Fläche, so ergibt sich global gesehen eine Flächen-Windungsdichte, die sowohl das vorgegebene Zielfeld erzeugt, als auch der Kontinuitätsbedingung genügt. Letztere Bedingung ist schon deshalb erfüllt, da jede einzelne Elementarsattelspule der Kontinuitätsbedingung genügt.

Die so erhaltene globale Windungsdichtefunktion ist damit an den durch die Lage der Elementarleiter bestimmten Schnittstellen definiert. Aufgrund des mathematischen Verfahrens ergeben sich keine ganzzahlige Windungszahlen. Bei einer hinreichend dichten Anordnung der Elementarsattelspulen kann jedoch durch ein geeignetes Integrationsverfahren die Position der tatsächlich benötigten, jetzt ganzzahligen Windungen gefunden werden. Hierzu integriert man, wie in Fig. 5 dargestellt, längs eines Integrationswegs  $S$ , wobei jeweils ganzzahlige Integrale des zum Integrationsweg orthogonalen Windungsanteiles erfaßt werden. Mathematisch gesehen bedeutet dies, daß auf dem Integrationsweg zu einem gegebenen Punkt  $x_i$  ein Punkt  $x_{i+1}$  gesucht wird, wobei gilt:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} \vec{w} \cdot d\vec{n}$$

5

Dabei ist  $\vec{w}$  die Windungsdichte und  $d\vec{n}$  die Normale zum Integrationsweg  $S$ . Zwischen den durch die ganzzahligen Integrale vorgegebenen Grenzen bestimmt man den Schwerpunkt der Integrationsfunktion und erhält somit einen Stützpunkt des entsprechenden Leiters (in Fig. 6 mit  $P$  bezeichnet).

Zuletzt müssen noch die zu jeder Windung gehörenden Stützpunkte zusammengefaßt werden und die Windungen entlang dieser Stützpunkte verlegt werden.

Die so erzeugten Spulendesigns weisen wegen der zugrundegelegten Flächenelemente entsprechende Flächen konstanter Stromdichte auf. Nach der Diskretisierung der Stromdichteverteilung in Form von realen Leitern entsteht ein typisches Muster von Zonen von unterschiedlicher Leiterdichte, die in azimuthaler Richtung verlaufenden Streifenmuster ergeben. Die Streifenbreite entspricht dabei der Breite der Flächenelemente. Typische Spulen, wie sie nach dem beschriebenen Verfahren bestimmt sind, sind in den Fig. 7 und 8 dargestellt.

Der besondere Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß nicht nur eine herkömmliche Optimierung auf ein Zielfeld hin durchgeführt werden kann, sondern durch Einführung geeigneter Randbedingungen auch andere Eigenschaften der Gradientenspule optimiert werden können.

Beispielsweise können die durch die geschalteten Gradientenfelder verursachten Wirbelströme im Kryoschild des Magneten minimiert werden. In einem hinreichend dichten Aufpunktraster am Ort des Kryoschildes wird für jede Elementarsattelspule zusätzlich die Radialkomponente des von ihr erzeugten magnetischen Feldes berechnet. Analog hierzu wird der oben bereits erwähnte Zielfeldvektor  $A = (A_{11}, A_{31}, A_{51}, \dots)$  erweitert um die Randbedingungen, daß die Summe aller Radialkomponenten in jedem Aufpunkt minimal wird:  $A' = (A_{11}, A_{31}, \dots, 0, \dots, 0, 0)$ . Dabei sind mit  $A_{11}, \dots$  wieder die Kugelfunktionsterme bezeichnet. In der tatsächlichen Minimierungsaufgabe kann man dann einen Wichtungsfaktor einfügen, der die zulässige Abweichung vom Zielfeld in Relation zu den Zusatzforderungen setzt. Bei entsprechender Formgebung der Spulenoberfläche (z. B. doppelschaliger Zylinder) ergibt sich, je nach Anforderung, eine ganz oder teilweise aktiv geschirmte Gradientenspule.

Des weiteren kann auch die Spuleninduktivität aufgrund geeigneter Randbedingungen minimiert werden. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Gradientenspulen sehr schnell geschaltet werden sollen. Wenn das Netz der Elementarsattelspulen hinreichend dicht ist, kann die Induktivität der Gradientenspulen durch die gesamte Induktivität aller Elementarsattelspulen unter Berücksichtigung ihrer jeweils zugehörigen Windungszahlen errechnet werden. Hierzu kann zusätzlich eine "Induktivitätsmatrix" berechnet werden, in der alle Eigen- und Koppelinduktivitäten aller Elementarsattelspulen enthalten sind. Die Komponenten des gesuchten Lösungsvektors  $W$  gehen quadratisch in die Induktivitätsrechnung ein, so daß bei einem Minimierungsansatz nach Differentiation ein lineares Problem übrigbleibt.

Ferner können durch Vorgabe geeigneter Randbe-

dingungen die durch Wirbelströme in Kryoschild verursachten Feldfehler korrigiert werden. Hierzu denkt man sich auch die Zylinderoberfläche des Kryoschildes in Elementarsattelspulen unterteilt. Es wird eine Matrix  $K$  berechnet, die die durch Flußverkopplung in allen Elementarsattelspulen des Kryoschildes induzierten Ströme für jede Elementarsattelspule der Gradientenspule beinhaltet. Dann gilt für den durch Wirbelströme verursachten Feldfehler  $F = K * L$ . Ersetzt man den Zielvektor  $A$  durch den Vektor  $A - F$ , erhält man bei iterativen Vorgehen eine Gradientenspule, die die als quasi-stationär angenommenen Wirbelstromfelder vorkorrigiert. Schließlich ist auch eine Minimierung der Reaktionskräfte Magnet-Gradient möglich, so daß der durch die Gradientenspule verursachte Lärm reduziert wird. Hierzu wird aufgrund einer geeigneten Randbedingung die für die Lorenzkraft entscheidene Feldkomponente der Gradientenspule am Ort der Magnetspule minimiert.

das mechanische Schwingungsverhalten minimiert wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

#### Patentansprüche

1. Transversale Gradientenspule, bei der die Leiter auf einem Träger angeordnet sind und auf Bahnen verlaufen, deren Stützpunkte nach folgendem Verfahren bestimmt sind:
  - a) über den Träger wird ein Gittermaschenetz gelegt;
  - b) jede Gittermasche wird mit einer Elementarsattelspule in Form einer geschlossenen Windung belegt;
  - c) das aus jeder Elementarsattelspule resultierende Magnetfeld wird berechnet;
  - d) mittels eines Fit-Algorithmus wird aufgrund einer vorgegebenen Ziel-Feldverteilung für jede Elementarsattelspule eine Ampere-Windungszahl festgelegt;
  - e) für jeden Maschenzweig wird durch Addition benachbarter Maschenzweige eine Amperewindungszahl ermittelt;
  - f) längs eines geeigneten Weges wird bei vorgegebenem Strom bis zu jeweils ganzen Windungszahlen integriert und damit diskrete Leiterpositionen ermittelt, die als Stützpunkte für die Bahn des Leiters dienen.
2. Transversale Gradientenspule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als diskrete Leiterposition nach Schritt f) die Schwerpunkte der über den Integrationsweg integrierten Funktion gewählt werden.
3. Transversale Gradientenspule nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Optimierung aufgrund eines Fit-Algorithmus zusätzlich zur gewünschten Feldverteilung physikalische Randbedingungen berücksichtigt werden, die das Gesamtverhalten der Gradientenspule günstig beeinflussen.
4. Transversale Gradientenspule nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Randbedingung Feldfehler aufgrund von Wirbelströmen im Kryoschild berücksichtigt und korrigiert werden.
5. Transversale Gradientenspule nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Randbedingung die Wirbelströme im Kryoschild minimiert werden.
6. Transversale Gradientenspule nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Randbedingung die globalen Biegekräfte minimiert werden.
7. Transversale Gradientenspule nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Randbedingung

- Leerseite -

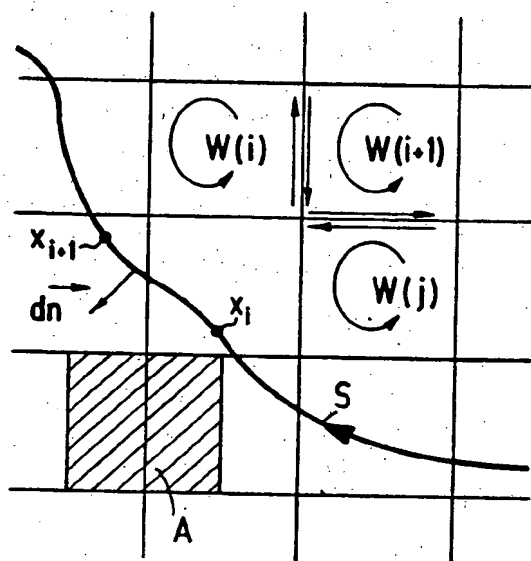


FIG 5

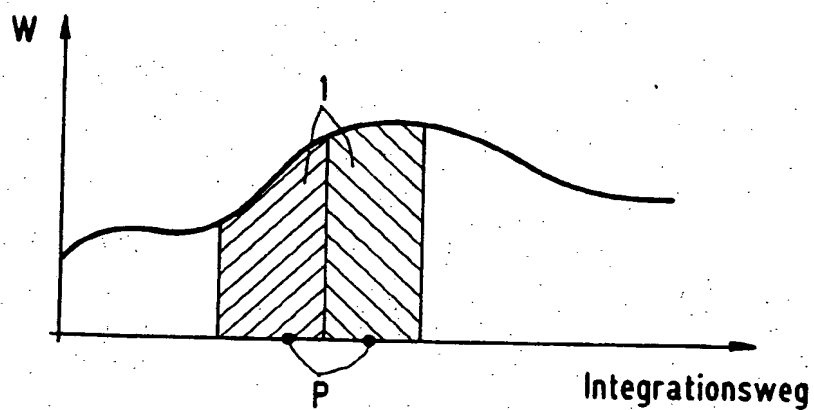


FIG 6

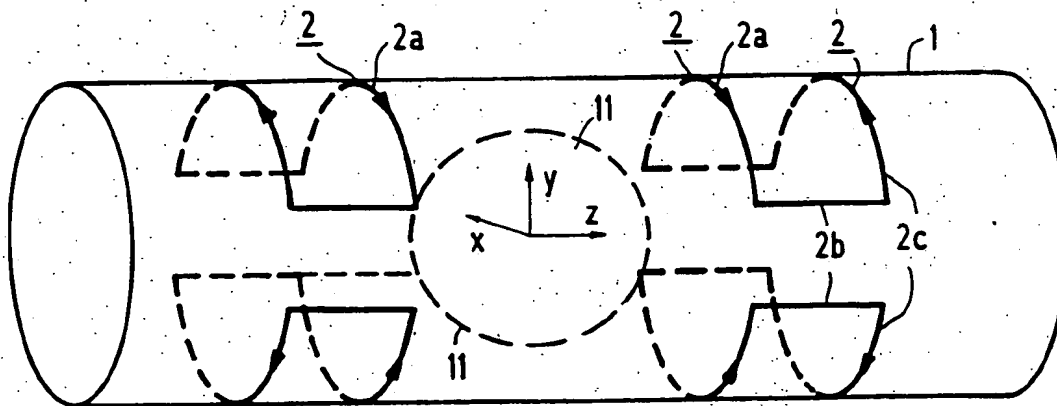


FIG 1

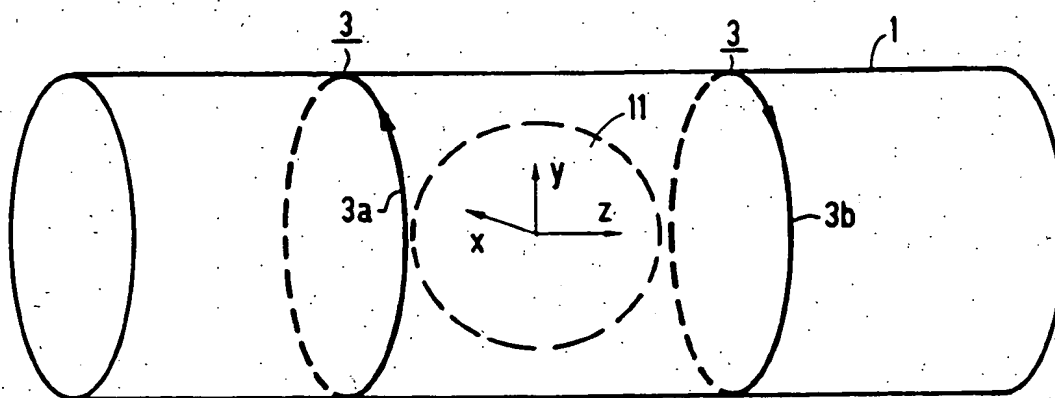


FIG 2

1	8			
2	9			
3	10			
4	11			
5	12			
6	13			
7	14			

FIG 3

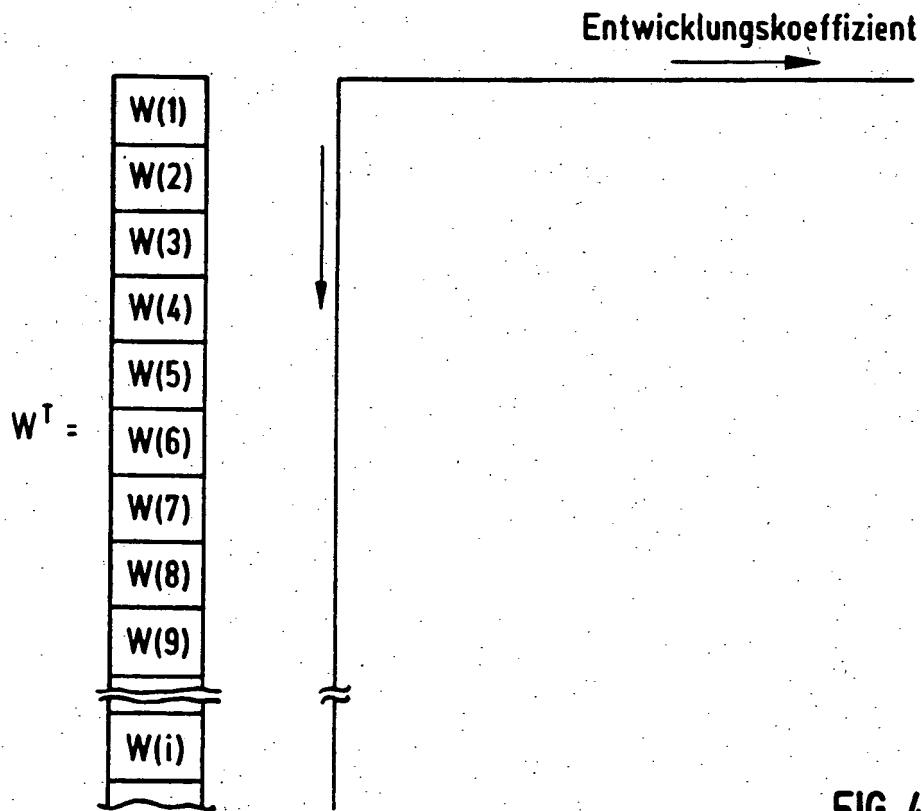


FIG 4



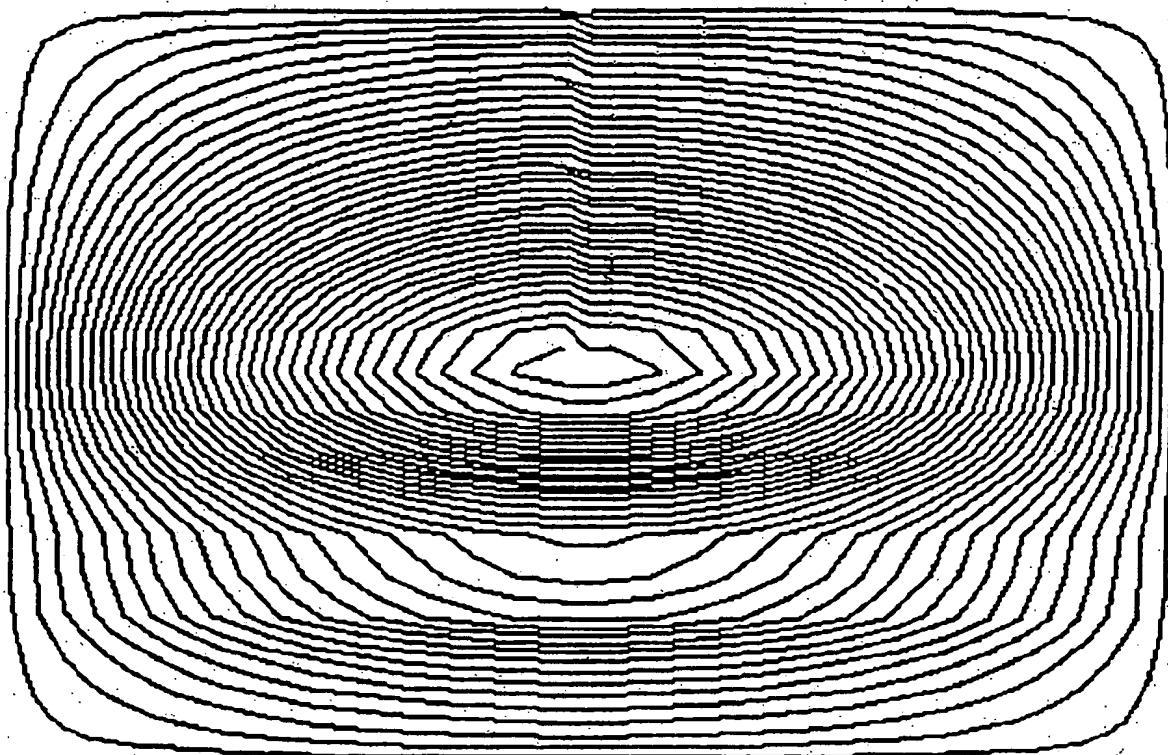


FIG 7

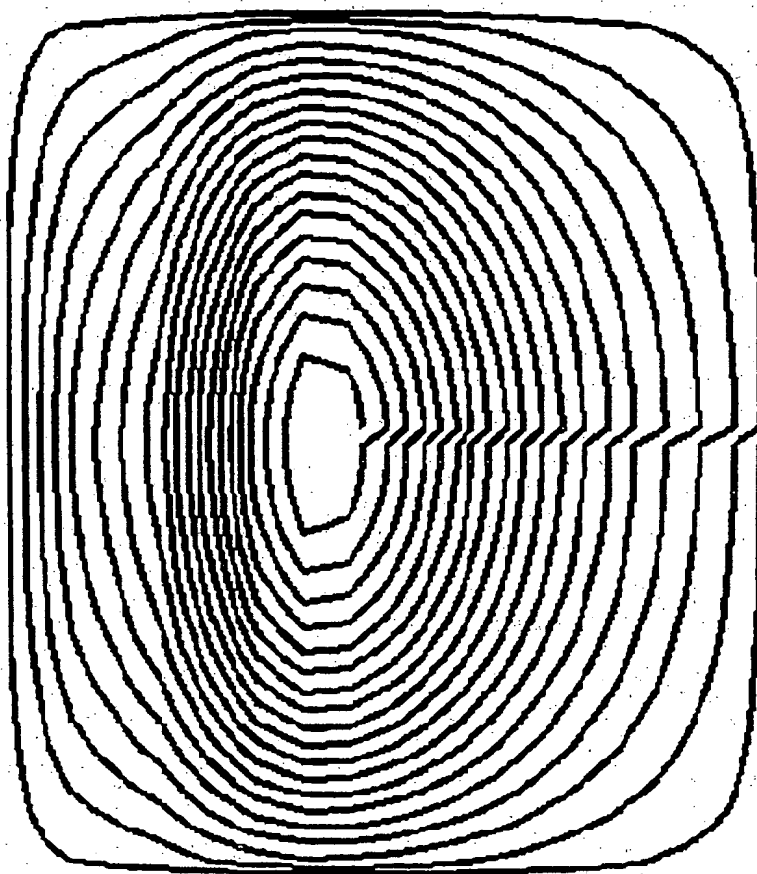


FIG 8

1/9/1

DIALOG(R) File 351:Derwent WPI

(c) 2004 Thomson Derwent. All rts. reserv.

009587808 \*\*Image available\*\*

WPI Acc No: 1993-281354/\*199336\*

XRFX Acc No: N93-216172

Transversal gradient coil esp. for NMR tomographic imaging - is supported at discrete points found by integration of computed winding density along path for predetermined magnetising current

Patent Assignee: SIEMENS AG (SIEI )

Inventor: PAUSCH G

Number of Countries: 002 Number of Patents: 003

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
DE 4203582	A1	19930902	DE 4203582	A	19920207	199336 B
DE 4203582	C2	19940303	DE 4203582	A	19920207	199408
US 5309107	A	19940503	US 9314220	A	19930205	199417

Priority Applications (No Type Date): DE 4203582 A 19920207

Patent Details:

Patent No	Kind	Lan	Pg	Main IPC	Filing Notes
DE 4203582	A1	9	G01R-033/38		
DE 4203582	C2	9	G01R-033/38		
US 5309107	A	10	G01R-033/20		

Abstract (Basic): DE 4203582 A

Each mesh of a grid network laid out on the coil support is occupied by an elementary saddle coil in the form of a closed winding. The magnetic field resulting from each elementary coil is computed and a fitting algorithm is used to determine an ampere-turns count for that coil on the basis of a predetermined target field distribution.

For each branch of the mesh an ampere-turns count is determined from addn. of adjacent branches. The results are integrated along a suitable path to find discrete positions (P) for conductor path support points.

ADVANTAGE - Max. linearity of magnetic flux is achievable with desired boundary conditions included in layout.

of

Dwg.6/8

Abstract (Equivalent): DE 4203582 C

A transverse gradient coil has conductors supported by a carrier, the support points being calculated numerically. A grid mesh network is placed over the carrier and each grid mesh is covered with a basic coil in the form of a closed turn. The magnetic field resulting from each basic coil is then calculated.

On the basis of a given target field distribution a fit algorithm is used to determine a number of ampere-turns for each basic coil. A number of ampere-turns is also found for each mesh branch by addition of adjacent branches. Integration along a suitable path at a given current is carried out upto whole turn numbers. This gives discrete conductor positions which serve as conductor support points.

ADVANTAGE - Complex coil structures can be calculated numerically without restriction.

Dwg.1/18

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

Abstract (Equivalent): US 5309107 A

For the purpose of constructing a transversal gradient coil, formed by a conductor, for producing a target field distribution with a prescribed current in a magnetic resonance imaging system, a series of points defining the locations of the coil conductor on a carrier are identified by placing a grid mesh network of elementary saddle coils over the carrier.

Subsequently the method involves calculating the magnetic field of these elementary saddle coils and defining a number of ampere-turns for each elementary saddle coil with a fit algorithm on the basis of the target field distribution. The discrete conductor position points are then identified by integration which, in combination, define the path of the coil conductor on the carrier.

USE/ADVANTAGE - For designing transversal gradient coil used in magnetic tomography appts. Provision for high linearity of gradient in order to avoid image distortions.

Dwg.5/8

Title Terms: TRANSVERSE; GRADIENT; COIL; NMR; TOMOGRAPHY; IMAGE; SUPPORT;  
DISCRETE; POINT; FOUND; INTEGRATE; COMPUTATION; WIND; DENSITY; PATH;  
PREDETERMINED; MAGNETISE; CURRENT

Derwent Class: S01; S03; V02

International Patent Class (Main): G01R-033/20; G01R-033/38

International Patent Class (Additional): H01F-007/20

File Segment: EPI

Manual Codes (EPI/S-X): S01-E02A; S01-H05; S03-E07; V02-F01G

THIS PAGE BLANK (USPTO)